

Psychoakustische Sonifikation zur Navigation in bildgeführter Chirurgie

TIM ZIEMER UND HOLGER SCHULTHEIS, BREMEN

1. Einleitung

In der bildgeführten Chirurgie wird das chirurgische Instrument in Relation zur Anatomie des Patienten mittels Sensoren erfasst und in einem virtuellen Anatomiemodell grafisch dargestellt. Hierin kann der Chirurg die Position seines Instruments, der Läsion und weiterer anatomischer Strukturen sehen, und so sicher navigieren. Bildgeführte Chirurgie ermöglicht Eingriffe, die ohne Unterstützung von Sensoren und bildgebenden Verfahren zu risikoreich wären, weil sich zum Beispiel ein Tumor in unmittelbarer Nähe zu einem wichtigen Nerv befindet. Ein Nachteil bildgeführter Chirurgie ist jedoch die hohe kognitive Belastung, insbesondere durch die Flut an inkohärenten, visuellen Informationen. Diese sorgt für lange Lernzeiten sowie eine hohe Operationsdauer und birgt die Gefahr von Ermüdung und Überforderung. Sonifikation kann als sinnvolle Ergänzung oder möglicherweise als Ersatz für Visualisierungen dienen.¹ Dies gilt insbesondere in Situationen, in denen dem Nutzer eine große Menge an Daten visuell dargeboten wird.²

In diesem Artikel beschreiben wir die kognitiven Probleme, die bei bildgeführter Chirurgie auftreten und stellen auf Grundlage der musikwissenschaftlichen Psychoakustik eine Sonifikationsmethode als Lösungsansatz vor. Sowohl die Identifikation der Probleme als auch die Herleitung und Implementierung der Lösung werden erst durch die enge Kooperation von Chirurgen und Wissenschaftlern aus den Bereichen der Chirurgie, Kognitionswissenschaft, Informatik und Musikwissenschaft möglich.

1.1 Bildgeführte Chirurgie

Bildgeführte Chirurgie wird auch als bildgestützte oder computerassistierte Chirurgie bezeichnet und umfasst insbesondere die chirurgische Navigation.³ In der bildgeführten Chirurgie wird

1 Sonifikation ist die systematische Erzeugung von Klang aus Daten. Einen Überblick über Taxonomie, Terminologie, Methoden und Anwendungen der Sonifikation liefert *The Sonification Handbook*, hrsg. von Thomas Hermann, Andy Hunt und John G. Neuhoff, Berlin 2011, <<http://sonification.de/handbook/>> (12.03.2020).

2 Bruce N. Walker und Michael A. Nees, „Theory of sonification“, in: *The Sonification Handbook*, hrsg. von Thomas Hermann et al., Berlin 2011, S. 9–39, <<http://sonification.de/handbook/>> (12.03.2020).

3 Details, siehe Werner Korb und Andreij Machno, „Computerassistierte und bildgestützte Chirurgie“, in: *Medizinische Physik. Grundlagen – Bildgebung – Therapie – Technik*, hrsg. von Wolfgang Schlegel, Christian P. Karger und

die Anatomie des Patienten mittels bildgebender Verfahren erfasst und ein dreidimensionales Modell erstellt. In diesem Modell werden Läsion sowie empfindliche und undurchdringliche Strukturen verschieden eingefärbt. Anhand dieses Modells wird der Eingriff geplant.⁴ Während des Eingriffs dient das Modell dazu, den Chirurgen zu führen. Hierfür wird die Position seines chirurgischen Instruments in Relation zur Anatomie von einem Tracking-System erfasst. Ein virtuelles Instrument wird grafisch an der korrekten Position im Modell eingebunden. Die erweiterte Anatomie des Patienten wird auf Bildschirmen dargestellt. In einigen Fällen beschränkt sich die Darstellung auf die zweidimensionale Darstellung des dreidimensionalen Anatomie-modells. In anderen Fällen werden mehrere zweidimensionale Ansichten, die Frontal-, Sagittal- und Transversalebene, angezeigt. Ein Beispiel ist in Abbildung 1 zu sehen.



Abbildung 1: IGS. Beispiel eines bildgeführten Eingriffs. Ein Bildschirm zeigt eine Draufsicht des dreidimensionalen Anatomiemodells sowie die drei anatomischen Ebenen.

Die bildliche Unterstützung ermöglicht Eingriffe, die ohne die Hilfe von Tracking-Systemen gefährlich für den Patienten sein könnten, wenn sich zum Beispiel ein Tumor sehr nahe an einem wichtigen Nerv, einer Arterie oder einer empfindlichen Membran befindet. Viele Eingriffe lassen sich mittels visueller Unterstützung sogar minimalinvasiv durchführen. Diese weisen gegenüber

Oliver Jäkel, Berlin/Heidelberg 2018, S. 697–706; und J. Kowal, F. Langlotz und L.- P. Nolte, „Basics of Computer-Assisted Orthopaedic Surgery“, in: *Navigation and MIS in Orthopedic Surgery*, hrsg. von James B. Stiehl, Werner H. Konermann, Rolf G. Haaker et al., Berlin, Heidelberg 2007, S. 2–8.

4 Siehe zum Beispiel Lucas E. Ritacco, „Virtual Preoperative Planning“, in: *Computer-Assisted Musculoskeletal Surgery. Thinking and Executing in 3D*, hrsg. von Lucas E. Ritacco und Edmund Chao, Cham 2016, S. 3–8.

offenen Eingriffen oft reduzierten Blutverlust, verminderte Schmerzen, geringere Infektionsgefahr, verkürzte Heilungsdauer und geringere Narbenbildung auf. Nachteile der bildgeführten Chirurgie sind aus Sicht der Chirurgen die lange Lernaufzeit und die vergleichsweise langsame Durchführung aufgrund der schwierigen räumlichen Orientierung.

1.2 Raumkognition

Die kognitiven Anforderungen an Chirurgen sind in bildgeführten Eingriffen sehr hoch. Nach der Konsultierung der Literatur⁵ haben wir Chirurgen befragt und Operationen beigeübt, um Ursachen von Problemen und mögliche Lösungsansätze zu identifizieren. Ein Engpass besteht insbesondere in der anspruchsvollen Verarbeitung visuell-räumlicher Informationen für die Navigation.⁶ Kognitive Belastungen entstehen vor allem durch:

- ungenutzte räumliche Auflösung,
- mentale Rotation, Verschiebung und Skalierung,
- Extraktion der Tiefendimension aus zweidimensionalen Projektionen,
- mentale Integration unterschiedlicher Visualisierungen,
- Berücksichtigung der Latenz oder
- unergonomische Geräteanordnung im OP.

Diese Belastungen werden im Folgenden genauer erläutert.

In Abbildung 1 sind viele der Probleme zu erkennen. Computerbildschirme stehen mitunter sehr weit entfernt. Dadurch wird das hohe horizontale und vertikale räumliche Auflösungsvermögen des menschlichen Auges nicht genutzt. Die Monitore zeigen die Anatomie aus einer Draufsicht, die möglichst die gesamte Läsion sowie den Eintrittspunkt des chirurgischen Instruments zeigt. Diese Draufsicht entspricht weder der Perspektive des Chirurgen noch der der Assistenten auf den Situs. Um anhand dieser Darstellung zu navigieren, muss der Chirurg die Darstellung in seine eigene Perspektive überführen, also mental rotieren, verschieben und skalieren. Bei der Ansicht auf das dreidimensionale Anatomiemodell handelt es sich um eine Projektion des dreidimensionalen Gebildes auf den zweidimensionalen Monitor. Die Tiefendimension muss vom Anwender mental aus der Visualisierung abgeleitet werden. Hierfür sollen die Darstellungen der zweidimensionalen Ebenen dienen. Jedoch muss der Chirurg auch diese Darstellungen mental in seine eigene Perspektive überführen. Darüber hinaus steht er vor der Herausforderung, die verschiedenen Darstellungen mental zu einem kohärenten Raummodell

5 Ergebnisse unserer Literaturrecherche sind zu finden in Tina Vajsbaher, Holger Schultheis und Nader K. Francis, „Spatial cognition in minimally invasive surgery: A systematic review“, in: *BMC Surgery* 18, 94 (2018).

6 Dies bestätigen zum Beispiel B. Jaramaz und A.M. DiGioia III, „CT-Based Navigation Systems“, in: *Navigation and MIS in Orthopedic Surgery*, hrsg. von James B. Stiehl, Werner H. Konermann, Rolf G. Haaker et al., Berlin/Heidelberg 2007, S. 9–14.

zusammenführen. Da Sensordaten in Echtzeit erfasst und als Positionsdaten für 3D Grafik-Rendering genutzt werden, Bildschirme jedoch rund 50 Einzelbilder pro Sekunde anzeigen, können sich Latenzen in der Signalverarbeitung auf rund 100 ms aufsummieren. Diese Latenzen zwingen den Chirurgen, sich langsam zu bewegen. Bei schnellen Bewegungen könnte eine gefährliche Nähe zu einer kritischen Struktur zu spät angezeigt werden. Darüber hinaus hat die Platzierung der Monitore oft keine hohe Priorität. Mitunter stehen diese sogar hinter dem Chirurgen, was sowohl die räumliche Orientierung erschwert als auch für eine unergonomische Haltung während des Eingriffs sorgt.

Eine naheliegende Möglichkeit, den visuellen Kanal zu entlasten, ist es, räumliche Informationen via Klang wiederzugeben. Um die räumliche Orientierung von Chirurgen zu unterstützen, wurden bereits verschiedene Klangsysteme vorgeschlagen und erfolgreich in chirurgischen Simulationen und tatsächlichen Eingriffen angewandt.⁷ Meist handelt es sich um simple Kollisionswarnsysteme, die den Abstand des chirurgischen Instruments zur dichtesten, kritischen Struktur, wie Arterien, empfindliche Membranen und wichtige Nerven, signalisieren. Oft werden diskrete Abstände via Klang dargeboten, wie 3 mm, 5 mm und 10 mm. Neuere Systeme geben darüber hinaus die Richtung an, in welcher sich kritische Strukturen befinden. In Versuchen zeigte sich, dass Chirurgen durch die Sonifikation deutlich seltener und kürzer die Bildschirme konsultieren, ohne an Präzision zu verlieren. Eine vorteilhafte Eigenschaft von Schall ist, dass selbst Schallquellen außerhalb des Blickfeldes und hinter blickdichten Hindernissen wahrgenommen werden können.

Um Chirurgen jedoch noch präziser und umfassender durch Klang bei der Navigation zu unterstützen, ist es wichtig, dass die klangliche Darstellung des Raumes möglichst konfliktfrei zur mentalen Repräsentation des Raumes ist. Das bedeutet insbesondere, dass die klanglichen Dimensionen in der Wahrnehmung:

- linear,
- orthogonal,
- hochaufgelöst und
- aus der Egoperspektive

sein müssen. Diese Anforderungen werden bislang von keiner Sonifikationsmethode erfüllt.

1.3 Sonifikation

Viele Sonifikationsmethoden wurden für Navigation im ein-, zwei- und dreidimensionalen Raum vorgeschlagen.⁸ Von diesen erfüllt keine die Anforderungen für chirurgische Navigation.

7 Einen Überblick über die Verwendung klanglicher Hilfsmittel in minimalinvasiver Chirurgie findet sich in David Black, Chriatian Hansen und Arya Nabavi et al., „A Survey of auditory display in image-guided interventions“, in: *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* 12, H. 9 (2017), S. 1665–1676.

8 Eindimensional: David Black, Julian Hettig und Maria Luz et al., „Auditory feedback to support image-guided medical needle placement“, in: *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* 12, H. 9 (2017),

Typische Probleme multidimensionaler Sonifikation sind in Abbildung 2 dargestellt. Eine nahe-
liegende Sonifikationsmethode ist, die Raumposition eines Ziels via Raumklang darzustellen.
Mittels räumlicher Lautsprechermethoden, wie Wellenfeldsynthese oder Ambisonics oder über
Binauralmethoden in Kopfhörern, wird eine virtuelle Schallquelle am Zielort positioniert.⁹ Diese
spielt einen gut lokalisierbaren Klang ab. Die Methode vermag es, drei orthogonale, lineare
Dimensionen aus der Egoperspektive darzubieten. Der größte Nachteil dieser Methode be-
steht darin, dass das räumliche Auflösungsvermögen des menschlichen Gehörs im Bereich von
 $1 \pm 3.6^\circ$ bis $32 \pm 22^\circ$ liegt.¹⁰ Das ist ungenügend für chirurgische Eingriffe, bei denen Millimeter
beziehungsweise deutlich kleinere Winkel als 1° entscheidend sein können. Alternativ wird das
sogenannte Parameter Mapping verwendet. Hierbei wird eine (Raum-)Dimension, zum Beispiel
als x bezeichnet, durch ein individuelles Klangattribut repräsentiert. Der Wert entlang dieser
Dimension wird durch die Intensität beziehungsweise Ausprägung dieses Attributs ausgedrückt.

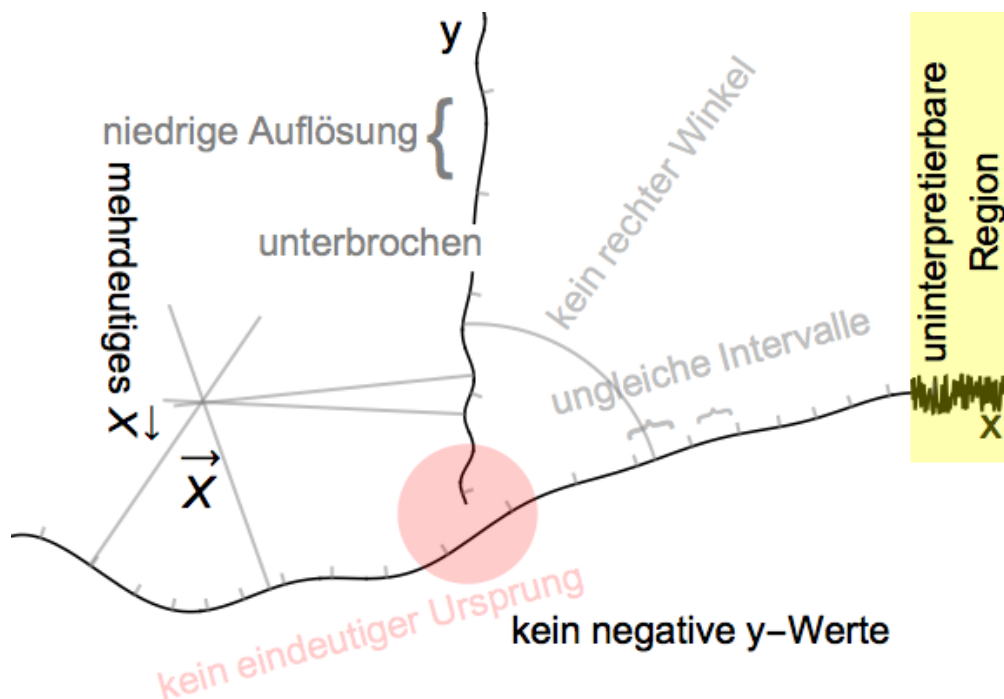


Abbildung 2: Typische Probleme bei der Wahrnehmung multidimensionaler Sonifikation: Achsen sind nicht orthogonal, nichtlinear und streckenweise schlecht aufgelöst oder gänzlich uninterpretierbar; Achsen haben nicht zwangsläufig einen absoluten Nullpunkt, eine positive und eine negative Richtung.

S. 1655–1663; zweidimensional: Antonio Vasilijevic, Kristian Jambrosic und Zoran Vukic, „Teleoperated path following and trajectory tracking of unmanned vehicles using spatial auditory guidance system“, in: *Applied Acoustics* 129 (2017), S. 72–85; dreidimensional: Tapio Lokki und Matti Gröhn, „Navigation with auditory cues in a virtual environment“, in: *IEEE MultiMedia* 12, H. 2 (2005), S. 80–86.

9 Eine Übersicht über Lautsprechersysteme und Kopfhörerwiedergabe in Tim Ziemer, *Psychoacoustic Music Sound Field Synthesis. Creating Spaciousness for Composition, Performance, Acoustics and Perception*, Cham 2020, hier S. 91 und 96.

10 Hierbei bezeichnet die erste Zahl den mittleren Lokalisationsfehler und die letzte den kleinsten Winkel, ab dem eine Positionsänderung überhaupt wahrgenommen wird. Details sind zu finden in Ziemer: *Psychoacoustic Music Sound Field Synthesis*, Kap. 4.

Daher ist es notwendig, orthogonale Dimensionen nicht über unabhängige physikalische Klangparameter darzustellen, sondern über Größen, die unabhängig wahrgenommen werden. Die Psychoakustik quantifiziert diese Größen via psychoakustische Attribute. Ein Mapping zwischen orthogonalen Eingangsdaten und psychoakustischen Klangattributen wird als perzeptuelles Mapping bezeichnet. Erfolgreiche Umsetzungen von perzeptuellem Mapping für multidimensionale Daten¹¹ erfüllen bislang nicht die für chirurgische Navigation notwendigen Anforderungen. Sie leiden unter einer oder mehreren der in Abbildung 2 dargestellten Schwächen. Für chirurgische Navigation ist eine Sonifikation notwendig, die einen Raum verklanglicht, wie er oben beschrieben und in Abbildung 3 wiedergegeben ist. Für eine erfolgreiche Umsetzung eignet sich die musikalische Psychoakustik.

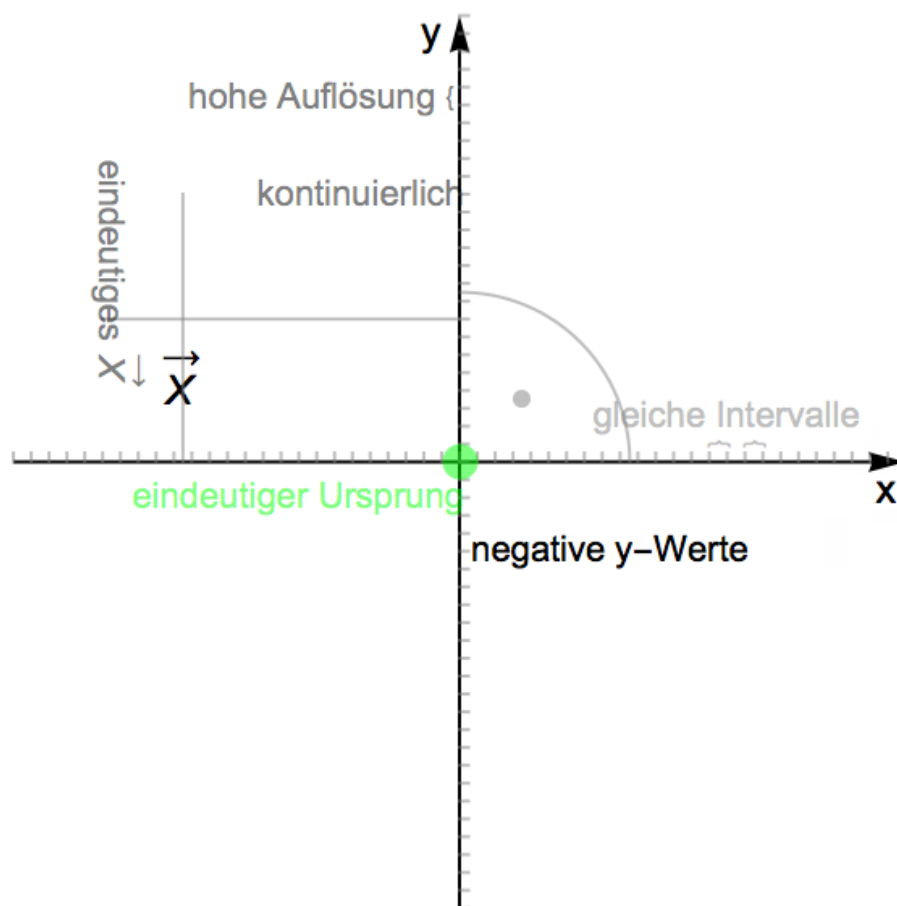


Abbildung 3: Wahrnehmung der psychoakustischen Sonifikation. Achsen sind orthogonal, linear und hochaufgelöst. In der Regel haben sie einen absoluten Nullpunkt, eine positive und eine negative Richtung.

¹¹ Wie zum Beispiel in Stephen Barrass, „A Perceptual Framework for the Auditory Display of Scientific Data“, in: *ACM Trans. Appl. Percept.* 2, H. 4 (2005), S. 389–402; Daniel S. Scholz, Sönke Rohde und Nikou Nikmaram et al., „Sonification of Arm Movements in Stroke Rehabilitation – A Novel Approach in Neurologic Music Therapy“, in: *Frontiers in Neurology* 7 (2016), Paper number 106; und Sam Ferguson, Densil Cabrera, Kirsty Beilharz und Hong-Jun Song, „Using psychoacoustical models for information sonification“, in: *12th International Conference on Auditory Display*, London 2006, <<http://hdl.handle.net/1853/50694>> (07.09.20).

1.4 Musikwissenschaft

Da die Sonifikation für chirurgische Navigation vom Anwender interaktiv gesteuert wird, sind die Navigationsklänge zwangsläufig transient. Insbesondere die musikalische Psychoakustik liefert Modelle, die einen Zusammenhang zwischen transienten Klängen und Klangwahrnehmung herstellen.¹² Dies unterscheidet sie von anderen Bereichen der Psychoakustik, deren Modelle oft anhand statischer Testsignale hergeleitet und verifiziert werden und daher nur bedingt auf transiente Signale anwendbar sind. Mit Hilfe der Erkenntnisse und Modelle aus der musikalischen Psychoakustik lässt sich eine psychoakustische Sonifikation herleiten, die sämtlichen Anforderungen für eine chirurgische Navigation erfüllt.

2. Methode

In der Literatur zur musikalischen Psychoakustik¹³ lassen sich fünf voneinander unabhängige Klangattribute finden: Chroma, Rauigkeit, Schwebungen, Klangfülle und Helligkeit. Diese können, wie in Abbildung 4 dargestellt, zu einem dreidimensionalen Raum kombiniert werden.¹⁴

Chroma beschreibt den zyklischen Aspekt der Tonhöhe, während der Höhenaspekt der Tonhöhe geradlinig ist. Chroma ist verantwortlich für die Oktavidentität. Bei Musikinstrumenten ändern sich Chroma und Höhe stets gemeinsam. Eine Ausnahme bildet der sogenannte Shepard-Ton¹⁵. Beim Shepard-Ton lässt sich das Chroma verändern, während die Höhe bestehen bleibt. Verschiebt man das Chroma langsam und kontinuierlich im Uhrzeigersinn, entsteht der Eindruck einer ewig steigenden Tonhöhe, obwohl sich tatsächlich das Chroma zyklisch verändert und die Höhe fix bleibt. Gegen den Uhrzeigersinn verschoben klingt die Tonhöhe scheinbar fallend. So lässt sich die komplette x-Dimension via Chromaänderung darstellen: Ein positiver x-Wert wird dadurch sonifiziert, dass das Chroma sich kontinuierlich im Uhrzeigersinn verschiebt. Ein negativer x-Wert wird durch eine kontinuierliche Chromaverschiebung gegen den Uhrzeigersinn abgebildet. Der Betrag der x-Koordinate wird linear auf die Frequenz der

12 Albrecht Schneider liefert in verschiedenen Kapiteln einen Überblick über die musikalische Psychoakustik und ihre Modelle: Albrecht Schneider, „Perception of timbre and sound color“, in *Springer Handbook of Systematic Musicology*, hrsg. von Rolf Bader Berlin/Heidelberg 2018, S. 687–726. Schneider, „Fundamentals“, in: ebd., S. 559–603. Schneider, „Pitch and Pitch Perception“, in: ebd., S. 605–685. Weitere musikalisch-psychoakustische Modelle für transiente Klänge sind in Marc Leman, „Visualization and Calculation of the Roughness of Acoustical Musical Signals Using the Synchronization Index Model (SIM)“, in: *Proceedings of the third international conference on digital audio effects (DAFx00)*, Verona, Dez. 2000; und Rolf Bader, „Cochlear spike synchronization and neuron coincidence detection model“, in: *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* 28, H. 2 (2018), Paper Number 023105, beschrieben.

13 Insbesondere Schneider, „Fundamentals“, ders., „Perception of timbre and sound color“ und ders., „Pitch and Pitch Perception“.

14 Details zur Signalverarbeitung sind in Tim Ziemer und Holger Schultheis, „A Psychoacoustic Auditory Display for Navigation“, in: *24th International Conference on Auditory Displays (ICAD2018)*, Houghton, MI 2018; und Tim Ziemer und Holger Schultheis, „Psychoacoustical Signal Processing for Three-Dimensional Sonification“, in: *25th International Conference on Auditory Displays (ICAD2019)*, Newcastle 2019, zu finden.

15 Hierbei handelt es sich um einen komplexen Ton, benannt nach seinem Erfinder, Roger N. Shepard, „Circularity in Judgments of Relative Pitch“, in: *The Journal of the Acoustical Society of America* 36, H. 12 (1964), S. 2346–2353.

zyklischen Chromaänderung gemapped.¹⁶ Am Koordinatenursprung ist das Chroma fix. So ist ein absoluter Nullpunkt gegeben.

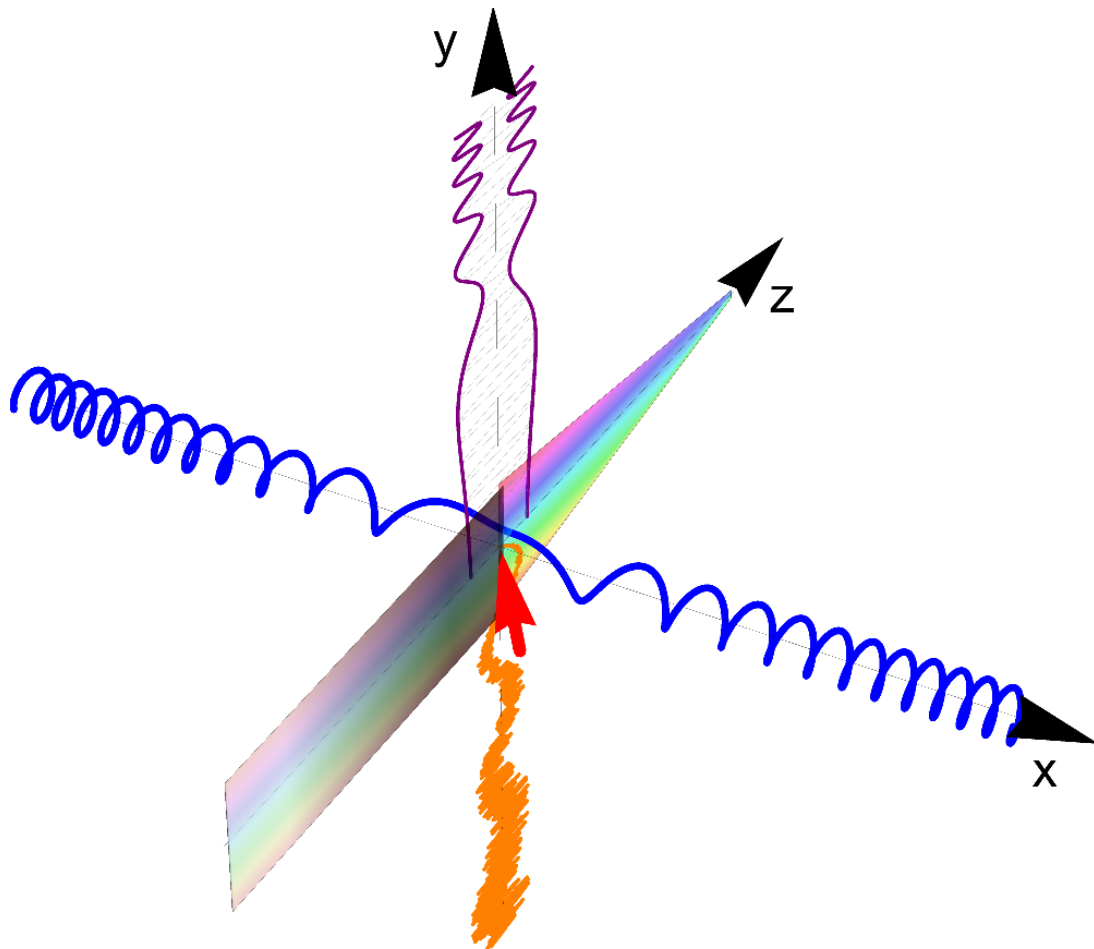


Abbildung 4: Grafische Darstellung der psychoakustischen Sonifikation. Verschiedene Klangattribute repräsentieren unterschiedliche Richtungen. Das Ausmaß einer Klangeigenschaft beschreibt die Entfernung entlang dieser Richtung. Die Richtung und Geschwindigkeit zyklischer Chromaänderungen beschreiben Richtung und Entfernung entlang der x-Achse. Die Schwebungsfrequenz beschreibt die Entfernung entlang der positiven y-Achse. Der Grad der Rauigkeit beschreibt die Entfernung entlang der negativen y-Achse. Das Ausmaß der Klangfülle beschreibt die Entfernung entlang der positiven z-Achse. Das Ausmaß der Helligkeit beschreibt die Entfernung entlang der negativen z-Achse.

Auditorische Schwebungen werden empfunden, wenn gleichzeitig mehrere Frequenzen einen Abstand zwischen etwa 0,1 Hz und 10 Hz zueinander aufweisen. Dieser Klangeindruck wird auch als Lautheitsschwankung bezeichnet. Die positive y-Achse wird via Schwebungen repräsentiert. Je größer der positive y-Wert, desto schneller die Schwebung. Diese lässt sich signaltechnisch via Amplitudenmodulation umsetzen. Wie auch bei der Chromaänderung wird die positive y-Koordinate linear auf die Frequenz der Schwebung gemapped.

¹⁶ Das lineare Mapping ist darauf zurückzuführen, dass die subjektive Dauer weitgehend der objektiven Dauer von Klängen entspricht, siehe Hugo Fastl und Eberhard Zwicker, *Psychoacoustics. Facts and Models*, 3. Ausgabe, Berlin/Heidelberg 2007, S. 265–269.

Auditorische Rauhigkeit wird empfunden, wenn gleichzeitig mehrere Frequenzen einen Abstand zwischen etwa 15 Hz und 80 Hz zueinander aufweisen. Die negative y-Achse wird über Rauhigkeit sonifiziert. Je größer der Betrag von y, desto rauher der Klang. Die Intensität der Rauhigkeit lässt sich über den Modulationsindex einer einfachen Frequenzmodulation regulieren.¹⁷ Das Mapping zwischen Rauhigkeit und Modulationsindex ist eine nichtlineare Funktion, die sich durch psychoakustische Modelle herleiten lässt.¹⁸ Am Ursprung der y-Achse weist der Klang weder Schwebung noch Rauhigkeit auf, sodass ein absoluter Nullpunkt gegeben ist.

Klangfülle wird auch als Klangvolumen bezeichnet. Typisches Merkmal eines vollen, voluminösen Klangs ist eine große Bandbreite, wie bei großen Trommeln, tiefen Orgeltönen und weißem Rauschen. Im Gegensatz dazu weisen schmalbandige Signale eine geringe Klangfülle auf, wie eine Telefonübertragung oder Musik aus dem Kofferradio. Die positive z-Achse wird negativ auf die Klangfülle gemapped. Je größer der z-Wert, desto geringer die Bandbreite. Das lässt sich zum Beispiel via Bandpassfilter umsetzen. Entsprechend der Literatur zur Tonhöhenwahrnehmung¹⁹ ist das Mapping zwischen positiver z-Koordinate und Bandbreite eine exponentielle Funktion.

Auditorische Helligkeit wird auch als Klangscharfe bezeichnet. Sie gilt als wichtiger Aspekt der Timbrewahrnehmung und reicht von dumpf über brillant bis schrill. Helligkeit resultiert vor allem aus der spektralen Energieverteilung: Je mehr Energie in hohen Frequenzen konzentriert ist, desto heller der Klang. Die negative z-Achse wird auf das Attribut Helligkeit gemapped. Je höher der negative z-Wert, desto heller der Klang. Helligkeit lässt sich über Hoch- oder Tiefpassfilter regulieren, indem also die Bandbreite einseitig beschnitten wird. Wie auch bei der Klangfülle ist das Mapping zwischen negativer z-Koordinate und Bandbreite eine exponentielle Funktion. Im Gegensatz zur x- und y-Achse weist die z-Achse keinen absoluten Nullpunkt auf, da keine klare maximale Klangfülle oder minimale Helligkeit implementiert ist.

All diese Klangattribute haben gemein, dass Menschen mehrere hunderte Abstufungen wahrnehmen können. Somit ist in jedem Fall eine deutlich höhere Auflösung gewährleistet als bei der Schallquellenlokalisierung gegeben ist.

Diese psychoakustische Sonifikation haben wir in diversen Studien validiert.²⁰ Es zeigt sich, dass ungeübte Hörer schon nach wenigen Minuten Erklärungen und Training in der Lage sind, verschiedene sonifizierte Koordinaten zu unterscheiden. Nach einer halben Stunde Training

17 Details und Begrifflichkeiten bezüglich der Frequenzmodulation sind in John Chowning und David Bristow, *FM Theory & Applications. By Musicians for Musicians*, Tokyo 1986, zu finden.

18 Zum Beispiel via massiven Trial-and-Error durch eine Rauheitsanalyse nach Leman, „Visualization“.

19 Siehe zum Beispiel Schneider, „Pitch and Pitch Perception“ und Fastl/Zwicker, „Psychoacoustics“, insb. Kap. 5.

20 Siehe zum Beispiel Tim Ziemer, Holger Schultheis und David Black et al., „Psychoacoustical Interactive Sonification for Short Range Navigation“, in: *Acta Acustica united with Acustica* 104, H. 6 (2018), S. 1075–1093; Tim Ziemer und Holger Schultheis, „Psychoacoustic auditory display for navigation: an auditory assistance system for spatial orientation tasks“, in: *J. Multimodal User Interfaces* 13 (2019), S. 205–218; und Ziemer/Schultheis, „A Psychoacoustic Auditory Display for Navigation“.

können Probanden bereits erfolgreich ein unsichtbares, 5 mm großes Ziel in einem zweidimensionalen, 20 mal 20 cm großen Raum finden. Obwohl die Probanden gänzlich ungeübt in auditiver Navigation waren, zeigte sich kein signifikanter Unterschied des Subjective Workload (nach NASA-TLX) zwischen auditiver und visueller Navigation. Zur Evaluierung der dreidimensionalen Sonifikation ist ein chirurgisches Setting vorbereitet, wie in Abbildung 5 zu sehen.



Abbildung 5: Sonifikationsexperiment im chirurgischen Setting. Studienteilnehmer navigieren am Modell via Grafik oder Klang zu den optimalen Bohrpunkten für eine Kraniotomie.

3. Fazit

In diesem Artikel wurde die psychoakustische Sonifikation als Navigationshilfe für chirurgische Eingriffe vorgestellt. Es wurde gezeigt, welche kognitiven Belastungsfaktoren in der bildgestützten Chirurgie auftreten und wie eine geeignete Sonifikation diese Faktoren mildern oder ganz vermeiden kann. Voraussetzung für einen gewinnbringenden Einsatz von Sonifikation in der chirurgischen Navigation ist, dass sie den dreidimensionalen Raum vollständig, hochaufgelöst und ohne Verzerrungen abbildet. Anhand einer konkreten Umsetzung einer Sonifika-

tion mit diesen Eigenschaften und der positiven Evaluation ihrer Nutzbarkeit wurde die Machbarkeit nachgewiesen. Zukünftige Arbeiten zur Weiterentwicklung der Sonifikation sowie zur Evaluation des Nutzens im chirurgischen Kontext sind in Vorbereitung.

Danksagungen

Wir danken den Projektbeteiligten aus der Universität Bremen, Fraunhofer MEVIS, Klinikum Bremen-Mitte und Mahidol University für wertvolle Einblicke und fruchtbaren Austausch, insbesondere Prof. M.D. Ron Kikinis, Prof. Dr. med Hüseyin Bektas, Dr. David Black, Tina Vajsbaher und Nuttawut Nuchprayoon.

Zitation: Tim Ziemer und Holger Schultheis, „Psychoakustische Sonifikation zur Navigation in bildgeführter Chirurgie“, in: *Freie Beiträge zur Jahrestagung der Gesellschaft für Musikforschung 2019*, hrsg. von Nina Jaeschke und Rebecca Grotjahn (= Musikwissenschaft: Aktuelle Perspektiven. Bericht über die Jahrestagung der Gesellschaft für Musikforschung 2019 in Paderborn und Detmold, Bd. 1), Detmold 2020, S. 347–358, DOI: 10.25366/2020.76.

Abstract

Sonification is the systematic transformation of data to sound. Sonification is a means to communicate information, to support navigation, or to explore data. In a multi-disciplinary research project we develop a psychoacoustically-motivated sonification that supports surgeons' orientation in image-guided interventions. One drawback of image-guidance is that neither the location of monitors nor the displayed view on the patient's anatomy coincides with the actual viewpoint of the surgeon. Surgeons need to mentally scale, rotate, and translate the displayed graphics. These operations are cognitively demanding. Sonification can reduce cognitive load and relieve the visual channel to improve the ergonomic situation in the operating room by communicating the location of the target, relative to the tool tip, like the center of a tumor relative to the ablation needle. By means of psychoacoustic sonification we ensure that the sounds are readily interpretable in terms of orthogonal and linear dimensions with a high resolution.

Kurzvitae

Holger Schultheis, geboren 1974 in Aachen, studierte von 1998 bis 2004 Informatik und Psychologie an der Philipps-Universität Marburg und der Universität des Saarlandes. An der Universität Bremen promovierte (2009) und habilitierte (2017) er in der Informatik. Er war Adjunct Professor im Department of Psychology der University of Notre Dame und ist nun Senior Researcher im Bremen Spatial Cognition Center und dem Institut für Künstliche Intelligenz an der Universität Bremen. Er ist Mitherausgeber des 2017 erschienenen Sammelbandes *Spatial Cognition X*.

Tim Ziemer, geboren 1986 in Henstedt-Ulzburg, studierte von 2006 bis 2010 systematische Musikwissenschaft, historische Musikwissenschaft und Betriebswirtschaftslehre an der Universität Hamburg und schloss 2016 seine Promotion im Fach Systematische Musikwissenschaft ab. Er forschte in der Musikwissenschaft der Universität Hamburg, am National Institute of Informatics, Tokyo, und im Bremen Spatial Cognition Center der Universität Bremen. Sein Buch *Psychoacoustic Music Sound Field Synthesis* ist 2020 im Springer-Verlag erschienen.

Freie Beiträge zur Jahrestagung der Gesellschaft für Musikforschung 2019

Herausgegeben von Nina Jaeschke und Rebecca Grotjahn

**Musikwissenschaft:
Aktuelle Perspektiven 1**

musiconn
für vernetzte Musikwissenschaft

Freie Beiträge

Musikwissenschaft: Aktuelle Perspektiven

Bericht über die Jahrestagung der Gesellschaft für Musikforschung 2019 in Paderborn und Detmold

Herausgegeben von Rebecca Grotjahn und Nina Jaeschke

Band 1

Freie Beiträge

zur Jahrestagung der Gesellschaft für Musikforschung 2019

Herausgegeben von Nina Jaeschke und Rebecca Grotjahn

Detmold: Musikwissenschaftliches Seminar der Universität Paderborn und der Hochschule für
Musik Detmold 2020

DOI: 10.25366/2020.42

Online-Version verfügbar unter der Lizenz: Urheberrecht 1.0,
<<https://rightsstatements.org/page/InC/1.0/?language=de>>

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Impressum

Redaktion: Nina Jaeschke, Rebecca Grotjahn und Jonas Spieker

Satz: Nina Jaeschke

© Musikwissenschaftliches Seminar der Universität Paderborn und der Hochschule für Musik Detmold 2020

INHALT

Vorwort	IX
Komponieren für das Radio: Akteure, Diskurse, Praktiken	1
Musikwissenschaft – Feminismus – Kritik: Ein Generationenaustausch	6
Stefan Alschner Der Wagner-Sänger Joseph Aloys Tichatschek – Vom Nachlass zum Netzwerk	14
Alenka Barber-Kersovan Songs for the Goddess. Das popmusikalische Neo-Matriarchat zwischen Ethno-Beat, erfundenen Traditionen und kommerzieller Vermarktung	23
Elias Berner, Julia Jaklin, Peter Provaznik, Matej Santi, Cornelia Szabó-Knotik Musikgeschichte anders erzählen? Das Beispiel der 1970er in Österreich. Musikhistoriographie in der Zeit der Digitalisierung	34
Mauro Fosco Bertola „Ein Laut so klagevoll“. <i>Lohengrin</i> zwischen Richard Wagner und Salvatore Sciarrino	45
Matthieu Cailliez Europäische Rezeption der Berliner Hofoper und Hofkapelle von 1842 bis 1849	55
Iacopo Cividini Zwischen klassischer Musikphilologie und angewandter Informatik: <i>Die Digitale Mozart-Edition (DME)</i> der Stiftung Mozarteum Salzburg	65
Marko Deisinger Fortschrittliche Technologie im Dienste eines Antimodernisten. Heinrich Schenker und der österreichische Rundfunk	84
Norbert Dubowy Vom Kritischen Bericht zur Kritischen Dokumentation am Beispiel der <i>Digital-interaktiven Mozart-Edition</i>	94
Markus Engelhardt Musik zwischen Nation Building und Internationalität. Italien um 1900	109
Maryam Haiawi Das Oratorium im Spannungsfeld der Konfessionen: Zum interkonfessionellen Austausch von Oratorien im 18. Jahrhundert	115

Judith I. Haug „Manch eine*r liegt, morgens noch trunken, im Rosengarten“ – Rekonstruktionen osmanischer Musikgeschichte in Gesangstextsammlungen	130
Renate Koch Marcel Prawy und das erste Broadway-Musical im Österreich der Nachkriegszeit	142
Susanne Kogler, Julia Mair, Juliane Oberegger, Johanna Trummer Erich Marckhl – Musikausbildung in der Steiermark nach 1945. Brüche und Kontinuitäten	150
Marie-Anne Kohl Die weinende Jury. „Geschlechtslose“ Tränen bei globalen Musik-Castingshows?	158
Fabian Kolb Tanztheater und filmische Ästhetik. Cineastische Einflüsse und Gestaltungsweisen in den Kompositionen für die Ballets Suédois 1920–1925	168
Christian Lehmann Tempobezeichnungen von Julius Stockhausen für <i>Die schöne Müllerin</i> : Ein Quellenfund	191
Martin Link <i>Signum et gens</i> – Zur Gendersemiotik in Clara und Robert Schumanns Liederzyklus <i>Liebesfrühling</i>	201
Livio Marcaletti „Strafspiel“ und satirische Stilmittel in musikdramatischen Gattungen des frühen 18. Jahrhunderts	211
Tobias Marx, Martin Lissner Thüringer Musikszene – Jugendmusikredaktionen als außerschulische musik- bezogene Bildungskontexte	224
Maho Naito Die Parallelität der Entstehungsprozesse der ersten beiden Symphonien Gustav Mahlers: Instrumentation, Revision und Dirigierpraxis	235
Elisa Novara Eine Schumann-Werkstatt? Zur Übertragbarkeit der Methoden vom Projekt „BeethovensWerkstatt“ auf andere Komponisten	244

Theodora Oancea, Joachim Pollmann, Jonas Spieker Kollaborateure – Involvierte – Profiteure. Erarbeitung eines Online-Lexikons zur Musik in der NS-Zeit	260
Kiron Patka „Ich wollte eigentlich Sängerin werden.“ Berufsselbstbilder von Tontechniker*innen im Radio	268
Siegwart Reichwald Die Leiden der jungen Clara: Das Klaviertrio Opus 17 als Ausdruck einer Neu-Romantikerin	277
Elisa Ringendahl Lied versus Oper – Pole musikalischer Gattungen bei Oscar Bie	292
Benedikt Schubert Struktur und Exegese. Über Eigentümlichkeiten in der Arie „Des Vaters Stimme ließ sich hören“ (BWV 7/4)	300
Uwe Seifert, Sebastian Klaßmann, Timo Varelmann, Nils Dahmen Computational Thinking in der Musikwissenschaft: Jupyter Notebook als Umgebung für Lehre und Forschung	309
Yusuke Takamatsu Synthese als Modus der Prozessualität bei Schubert: Sein spezifisches Wiederholungsprinzip im langsamen Satz	320
Daniel Tiemeyer Johann Nepomuk Hummels Sonate in fis-Moll Op. 81 – Studien zu Entstehungshintergrund, Rezeption und formaler Struktur	326
Andrea van der Smissen Musikalische Innovation im Umfeld der Moderne und historischen Avantgarde in Ungarn	335
Tim Ziemer, Holger Schultheis Psychoakustische Sonifikation zur Navigation in bildgeführter Chirurgie	347
Magdalena Zorn Musik mit dem Radio hören: Über den Begriff der musikalischen Aufführung	359

Gabriele Buschmeier in memoriam

Vorwort

Die vorliegenden Bände dokumentieren die Jahrestagung der Gesellschaft für Musikforschung 2019. In den dreieinhalb Tagen vom 23. bis zum 26. September 2019 wurden in Paderborn und Detmold nicht weniger als 185 Beiträge präsentiert, verteilt auf diverse Symposien, Round tables, Freie Sektionen und Postersessions. Sie alle auf einen Nenner bringen zu wollen, ist ein Ding der Unmöglichkeit – und das ist gut so, ist es doch Ziel der Jahrestagungen, die große Vielfalt der Themen und Methoden des Faches Musikwissenschaft abzubilden. Um die thematische Vielfalt der freien Referate angemessen abbilden zu können und gleichzeitig den inhaltlichen Schwerpunkten der beiden hier publizierten Hauptsymposien ausreichend Raum bieten zu können, erscheinen diese in drei Bänden.

„Musikwissenschaft: Aktuelle Perspektiven“: Der Titel der kleinen Reihe ist keine Verlegenheitslösung. Musikwissenschaft im Kontext der Digital Humanities; Musikwissenschaft und Feminismus; Musik und Medien; Musikalische Interpretation – schon die Felder, die von den vier Hauptsymposien bespielt wurden, wären noch vor wenigen Jahrzehnten allenfalls an der Peripherie des Faches zu finden gewesen. Sie entsprechen Arbeitsschwerpunkten der Lehrenden am Musikwissenschaftlichen Seminar der Universität Paderborn und der Hochschule für Musik Detmold, das die Tagung ausrichtete. Zugleich nehmen sie Bezug auf aktuelle Ereignisse und Entwicklungen. So erwuchs das von Andreas Münzmay und Joachim Veit organisierte Symposium „Brückenschläge – Informatik und Musikwissenschaft im Dialog“ unmittelbar aus den Erfahrungen im Virtuellen Forschungsverbund Edirom (ViFE) und im fakultäten- und hochschulübergreifenden Zentrum Musik–Edition–Medien (ZenMEM). Der 200. Geburtstag von Clara Wieck/Schumann war der Anlass für das von Rebecca Grotjahn geleitete Symposium „Die Begleiterin – Clara Schumann, Lied und Liedinterpretation“, das in enger Kooperation mit der Hochschule für Musik Detmold durchgeführt wurde. Das Hauptsymposium „Brückenschläge“ wird in einem separaten Band publiziert (Bd. 3 der vorliegenden Reihe). Im Rahmen dieses Symposiums führte die von Stefanie Acquavella-Rauch geleitete Fachgruppe Digitale Musikwissenschaft eine Posterpräsentation durch, die von den Beiträger*innen erfreulicherweise zu kürzeren Texten umgearbeitet wurden, sodass sie hier ebenfalls, zusammen mit den Postern, publiziert werden können. Hinzu kommen einige Beiträge, die bereits bei der Jahrestagung 2018 in Osnabrück präsentiert wurden. Auch das Hauptsymposium „Die Begleiterin“ wird in einem eigenen Band (Bd. 2) publiziert. Die Beiträge zu den beiden anderen Hauptsymposien hingegen werden an anderen Orten veröffentlicht; in Band 1 („Freie Beiträge zur Jahrestagung der Gesellschaft für Musikforschung 2019“) der vorliegenden Publikation finden sich jedoch Einführungen und Abstracts. Das Symposium „Komponieren für das Radio“ unter Leitung von Antje Tumat und Camilla Bork (Katholieke Universiteit Leuven) behandelte Einflüsse des Mediums auf Kompositionsprozesse sowie durch radiophone Kompositionen bzw. radiophonen Klang ausgelöste Diskurse. Sarah Schauburger und Cornelia Bartsch (Universität Oldenburg) nahmen das 25-jährige Jubiläum der Fachgruppe Frauen- und Genderstudien zum Anlass für einen Generationenaustausch zum Thema „Musikwissenschaft – Feminismus – Kritik“: Was wa-

ren vor einem Vierteljahrhundert Inhalte und Aufgaben einer feministischen Musikwissenschaft und wie kann sich diese heute positionieren?

Bewusst haben wir im Tagungsbericht auf inhaltliche Eingriffe in die Beiträge verzichtet.¹ Das gilt besonders für die Freien Referate: Es galt, den Charakter der Jahrestagung als Forum für ‚freie‘, d. h. innovative und auch experimentelle Gedanken zu wahren. Einige Kolleg*innen, die die Tagung mit Vorträgen und Posterpräsentationen bereichert hatten, haben sich gegen eine Publikation im vorliegenden Band entschieden – sei es, weil sie eine Möglichkeit fanden, ihre Beiträge in einem inhaltlich passenderen Rahmen zu veröffentlichen, sei es, weil ihre Überlegungen in ihre entstehenden Qualifikationsschriften fließen sollen, oder sei es, weil sie von den Autor*innen in der vorgetragenen Form zunächst verworfen wurden. Auch damit erfüllt eine Freie-Referate-Sektion ihren Zweck: Die Diskussionen mit der versammelten Fach-Öffentlichkeit sollen dabei helfen, Gedanken weiterzuentwickeln und zu verändern. In diesem Sinne sei allen Beteiligten – den Autor*innen, den nichtpublizierenden Referent*innen und den Mit-Diskutant*innen – ganz herzlich gedankt für ihr Mitwirken bei der Tagung.

Unser herzlicher Dank gilt einer Reihe weiterer Personen, die zum Gelingen dieser drei Bände beigetragen haben. Hier ist besonders Jonas Spieker zu nennen, der uns tatkräftig bei der Redaktion geholfen hat. Andrea Hammes (SLUB Dresden) sei herzlich für die Aufnahme unseres Bandes auf *musiconn.publish* gedankt – wir freuen uns, damit unsererseits zur Etablierung dieser innovativen Publikationsplattform beizutragen.

Erneut möchten wir an dieser Stelle allen Menschen danken, die uns bei der Organisation, Ausrichtung und Finanzierung der Tagung selbst unterstützt haben: der Präsidentin der Universität Paderborn, Prof. Dr. Birgitt Riegraf, dem Rektor der Hochschule für Musik Detmold, Prof. Dr. Thomas Grosse, den Kolleginnen und Kollegen der beiden beteiligten Hochschulen, dem Vorstand der Gesellschaft für Musikforschung, der Universitätsgesellschaft Paderborn und allen Sponsoren. Besonders dankbar sind wir den Mitarbeiter*innen und den studentischen bzw. wissenschaftlichen Hilfskräften des Musikwissenschaftlichen Seminars, die bei der Vorbereitung und Ausrichtung der Tagung immensen Einsatz zeigten – stellvertretend sei an dieser Stelle Johanna Imm erwähnt, die zusammen mit Nina Jaeschke das Herz des Organisationsteams bildete.

Wir widmen diese Reihe Dr. Gabriele Buschmeier, dem langjährigen Vorstandsmitglied der Gesellschaft für Musikforschung, die kurz vor der Publikation dieses Bandes unerwartet verstarb.

Detmold, im September 2020

Rebecca Grotjahn und Nina Jaeschke

Zitation: Rebecca Grotjahn und Nina Jaeschke, „Vorwort“, in: *Freie Beiträge zur Jahrestagung der Gesellschaft für Musikforschung 2019*, hrsg. von Nina Jaeschke und Rebecca Grotjahn (= Musikwissenschaft: Aktuelle Perspektiven. Bericht über die Jahrestagung der Gesellschaft für Musikforschung 2019 in Paderborn und Detmold, Bd. 1), Detmold 2020, S. IX–X, DOI: 10.25366/2020.43.

1 Freigestellt war den Autor*innen auch, ob sie sich für eine gendersensible Sprache entscheiden bzw. welche Form des Genderns sie bevorzugen.